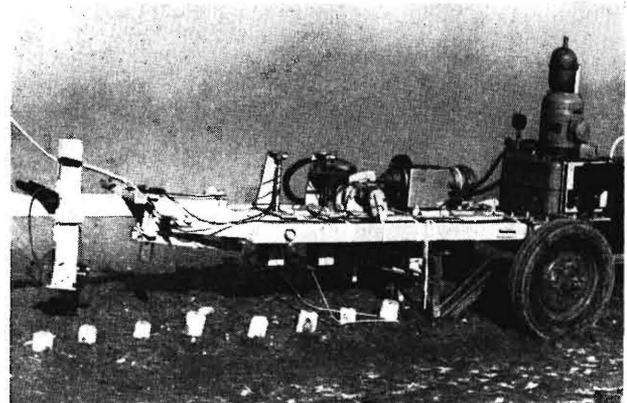


# Regelungssysteme zur selbsttätigen Nachführung von landwirtschaftlichen Werkzeugen und Maschinen

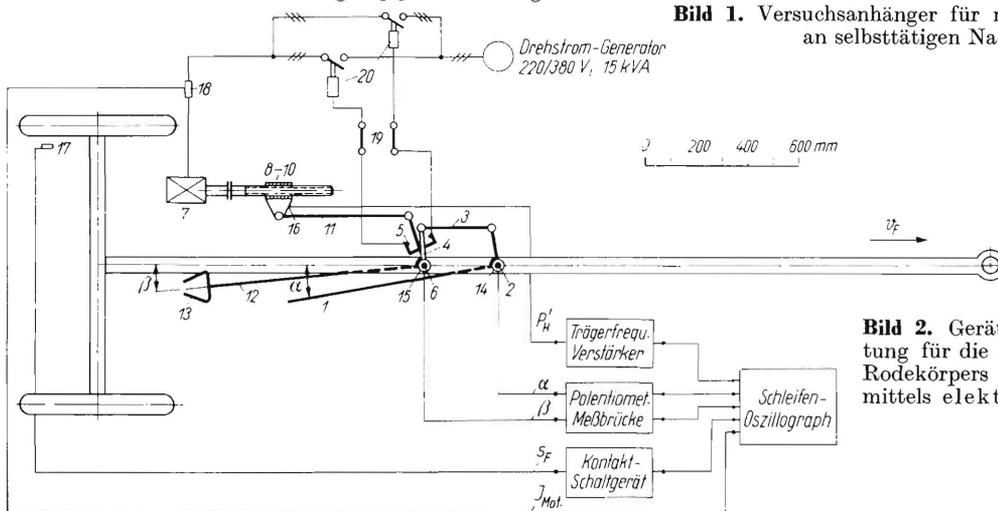
Von Roman Thiel, Braunschweig-Völkenrode

Im allgemeinen Maschinenbau gibt es für die Regelungstechnik wegen ihrer großen Bedeutung sehr viele Unterlagen über die Theorie der Regelkreise und über die Geräte für die Regler und Stellglieder [1]. In neuerer Zeit hat die Regelungstechnik auch im Bereich der Landtechnik Eingang gefunden [2]. Von den dabei auftretenden Problemen wird im Folgenden die selbsttätige Nachführung von Werkzeugen [3 bis 6] näher behandelt. Die Leistungsregelung an Landmaschinen [7] und andere Fragen werden gesondert untersucht.

Die zum Teil sehr schwierigen Arbeitsbedingungen beim Einsatz der Landmaschinen stellen an die Regelungsanlagen besonders in gerätetechnischer Hinsicht große Anforderungen, z. B. an die Regelgeschwindigkeit sowie an die Einfachheit und mechanische Widerstandsfähigkeit der Konstruktion. Um weitere Unterlagen für den Entwurf von Nachführungsanlagen zu schaffen, wurden frühere Messungen [2] zur Klärung des zeit-



**Bild 1.** Versuchsanhänger für meßtechnische Untersuchungen an selbsttätigen Nachführungsanlagen



**Bild 2.** Geräteschema der Versuchseinrichtung für die selbsttätige Nachführung eines Rodekörpers durch Hebelverstellung mittels elektromechanischer Dreipunktregelungsanlage.

- |  |   |
|--|---|
| 1 Tastfühler   | } elektromechanische<br>Regeleinrichtung                |
| 2 Drehachse des Tastfühlers  |   |
| 3 Koppel   |   |
| 4 Kontakthebel, lose auf Achse 6   |   |
| 5 Steuerkontakte, fest auf Achse 6                                       |   |
| 6 Drehachse des Stellgliedes   |   |
| 7 Elektromotor,<br>durch Kontakte 4 und 5 betätigt                       | } Stellglied zur<br>Nachführung des<br>Rübenrodekörpers |
| 8 Stufenlos-einstellbares Getriebe                                       |   |
| 9 Schneckengetriebe  |   |
| 10 Schwinghebel  |   |
| 11 Koppel  |   |
| 12 Winkelhebel auf Achse 6 zum<br>seitlichen Verschwenken des Werkzeuges |   |
| 13 Rübenrodekörper   |   |
| 14 Meßgeber für den Winkelausschlag des Fühlers 1                        |   |
| 15 Meßgeber für den Winkelausschlag des Stellhebels 12                   |   |
| 16 Meßgeber für die Stellkraft   |   |
| 17 Radkontakt für die Messung der Fahrgeschwindigkeit                    |   |
| 18 Stromteiler zur Registrierung des Motorstromes                        |   |
| 19 Endkontakte   |   |
| 20 Drehstromluftschütze für die Motorsteuerung                           |   |

lichen Verhaltens der Regelkreise sowie der Leistungsaufnahme des Stellgliedes von verschiedenen Regelungsanlagen weitergeführt<sup>1)</sup>.

## 1. Durchführung der Versuche

Um unabhängig von ausgeführten Landmaschinen für bestimmte Einzelaufgaben zu sein und um möglichst allgemeingültige Unterlagen für Nachführungssysteme zu bekommen, wurde der in **Bild 1** gezeigte Meßanhänger gebaut. Mit ihm konnten bei Versuchen mit verschiedenen Nachführungseinrichtungen in der horizontalen Ebene folgende Teile variiert werden: Reglerart, Regelgeräte, Stellglied und kinematisches System der Nachführung. Weitere Variationsmöglichkeiten ergeben sich durch Änderung der Wirkungsrichtung in der senkrechten Ebene, des Arbeitselementes, des Fühlers, der landwirtschaftlichen Aufgabe usw.

Für die Versuche wurde als Beispiel für ein Arbeitselement mit schwierigen Arbeitsbedingungen ein Polderschar für Zuckerrüben verwendet. Die jeweils benötigten Meßgrößen (Winkel für Fühler, für Werkzeug und für Achsschenkel, Werkzeugabweichung von Rübenreihe, Stellkraft, Fahrgewicht, Steuerkolbenweg

*Dr.-Ing. Roman Thiel war Abteilungsleiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, und ist Dozent für Elektrotechnik an der Staatlichen Ingenieurschule in Darmstadt.*

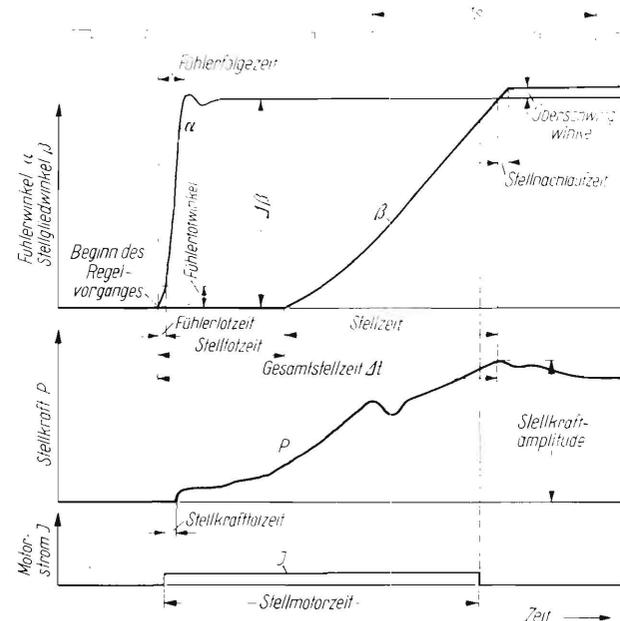
<sup>1)</sup> Für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Untersuchungen sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft auch an dieser Stelle verbindlichst gedankt.

u. a.) wurden mit elektronischen Meßverstärkern und Lichtstrahl-  
oszillographen registriert. Es wurden vor allem die Übergangs-  
funktion und zum Teil die Ortskurve des Frequenzganges des  
Regelungssystems ermittelt und praktische Rodeversuche durch-  
geführt<sup>2)</sup>).

**2. Nachführungssystem mit elektro-mechanischer  
Dreipunktregelungsanlage**

Mit Rücksicht auf den Preis oder die Betriebsbedingungen  
kann es mitunter zweckmäßig sein, für selbsttätige Nachfüh-  
rungsanlagen an Landmaschinen nicht hydraulische, sondern  
elektrische Regelgeräte zu verwenden. In Fortführung von  
früheren Untersuchungen [2] wurde deshalb auch ein System  
zur Rodekörperrückführung durch Hebelverstellung mit elektro-  
mechanischer Regelungsanlage untersucht.

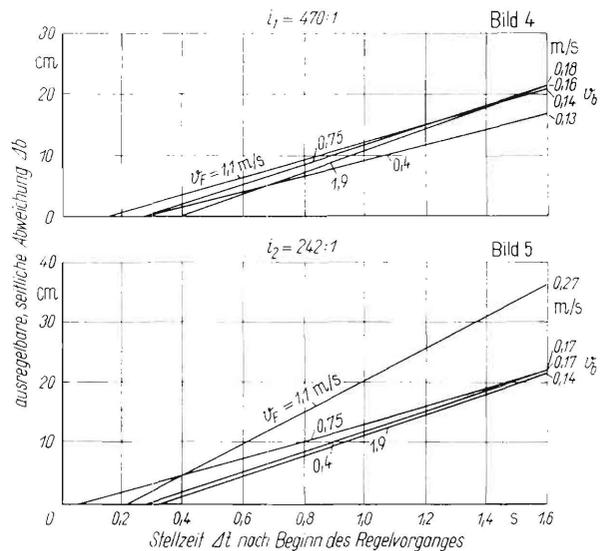
Das Geräteschema der auf dem Versuchsanhänger aufgebauten  
Anlage ist in **Bild 2** dargestellt. Die Länge des Fühlers ist gleich  
der Länge des Rodekörper-Stellhebels. Der Abstand der Dreh-  
achsen 2 und 6 von 0,3 m ist ungefähr gleich dem mittleren  
Rübenabstand. Bei einer Abweichung des Fühlerendes gegen-  
über dem Rodekörper wird über die Steuerkontakte der Elektro-  
motor eingeschaltet. Dieser verstellt über ein Doppelgetriebe  
den Stellhebel des Rodekörpers so lange, bis der Rodekörper  
die vom Fühler vorgegebene Abweichung von der Mittelachse  
des Versuchsanhängers als Führungslinie erreicht hat.



**Bild 3.** Übergangsfunktion eines elektro-mechanischen Nachlauf-  
reglers mit Begriffsbezeichnungen.

Zur Untersuchung des Verhaltens der Regelungsanlage bei  
der selbsttätigen Nachführung von sprunghaften seitlichen Ab-  
weichungen wird die Übergangsfunktion gemäß **Bild 3** auf-  
genommen. Damit erhält man zahlenmäßige Ergebnisse für die  
Totzeit, Stellgeschwindigkeit und Stellkraft. Da sich in den  
erhaltenen Oszillogrammen der Übergangsfunktion ein etwa  
linearer Anstieg der Werkzeugverstellung über der Zeit ergab,  
konnten die in **Bild 4 und 5** gezeigten idealisierten Übergangs-  
funktionen gezeichnet werden. Hierfür wurde die linearisierte  
Abhängigkeit der Werkzeugverschiebung von der Stellzeit, d. h.  
die scheinbare Stellgeschwindigkeit  $v_b = \Delta b / \Delta t$  unter Berück-  
sichtigung der Stelltotzeiten als Mittelwert von jeweils mehrfach  
wiederholt registrierten Übergangsfunktionen für verschiedene  
Betriebsbedingungen dargestellt. Bild 4 zeigt die Ergebnisse für  
ein Getriebeübersetzungsverhältnis  $i_1 = (20,8 \cdot 22,6) : 1 = 470 : 1$   
und Bild 5 für  $i_2 = (10,7 \cdot 22,6) : 1 = 242 : 1$ , jeweils für vier  
verschiedene Fahrgeschwindigkeiten. Die Werte der scheinbaren  
Stellgeschwindigkeit liegen meist in der Größenordnung von

$v_b = 0,15$  m/s. Die nicht eindeutige Abhängigkeit der Stell-  
geschwindigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei diesen Ergeb-  
nissen ist wahrscheinlich durch unsichere Betriebsbedingungen  
in dem verwendeten, stufenlos verstellbaren Untersetzungs-  
getriebe bedingt. Im allgemeinen zeigen die Werte der schein-  
baren Stellgeschwindigkeit ein verhältnismäßig unabhängiges  
Verhalten gegenüber der Fahrgeschwindigkeit. Die Werte der  
Stelltotzeit streuen jedoch sehr stark im Bereich von 0,1 bis 0,4 s.



**Bild 4 und 5.** Idealisierte Übergangsfunktionen der selbsttätigen  
Werkzeugnachführung im Boden durch Hebelverstellung mittels  
elektro-mechanischer Dreipunktregelungsanlage.

Ausregelbare Abweichung  $\Delta b$  in Abhängigkeit von der Zeit nach Beginn des  
Regelungsvorganges für zwei Getriebeübersetzungsverhältnisse  $i_1 = 470 : 1$   
und  $i_2 = 242 : 1$  bei jeweils vier verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

Bodenfeuchtigkeit in 1 bis 10 cm Tiefe	14%
Porenvolumen in 1 bis 5 cm Tiefe	37%
Porenvolumen in 6 bis 10 cm Tiefe	33%
$v_b$ Stellgeschwindigkeit	
$v_F$ Fahrgeschwindigkeit	

Aus diesen Ergebnissen erkennt man ein grundsätzlich äh-  
nliches Verhalten der Nachführungsanlage mit elektro-mech-  
anischem Regler und von anderen untersuchten Anlagen mit  
hydraulischem Regler.

**3. Nachführungssystem mit hydraulischem stetigem  
Regler**

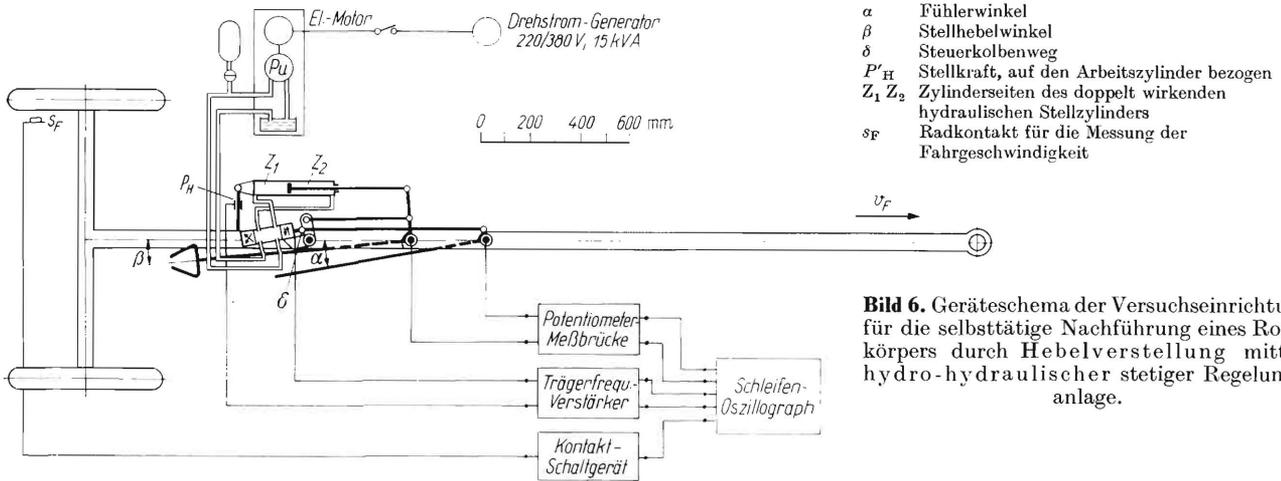
**3.1 Geräteschema**

Im Vergleich zu den Nachführungsanlagen mit Dreipunkt-  
regler werden auch Anlagen mit stetigem Regler untersucht,  
um vor allem einfach übersehbare Bedingungen für die Aufnahme  
der Ortskurve des Frequenzganges zu haben. Zu diesem Zweck  
wurde eine Rodekörper-Nachführungsanlage nach dem Geräte-  
schema in **Bild 6** mit einem eigens dafür hergestellten, hydrau-  
lischen Steuergerät aufgebaut.

Ein mechanischer Fühlerhebel tastet die seitliche Abweichung  
der Rüben gegenüber der Mittellinie des Aufsattelanhängers als  
Führungslinie ab, wobei der Fühlerwinkel  $\alpha$  entsteht. Der Fühler  
betätigt über einen kurzen Hebel den Steuerschieber des hydrau-  
lischen Steuergerätes. Dadurch wird der doppelt wirkende  
hydraulische Stellzylinder über  $Z_1$  oder  $Z_2$  nach rechts oder  
links beaufschlagt. Über dessen Kolbenstange wird der Werk-  
zeugwinkelhebel mit dem Winkel  $\beta$  gedreht und verschiebt  
schließlich den Rodekörper in die durch das Fühlerende vorge-  
gebene Lage. Bei gleichen Längen von Fühlerhebel und Werk-  
zeugstellhebel muß  $\alpha = \beta$  gemacht werden. Durch einen Ver-  
bindungshebel zwischen dem Werkzeugstellhebel und dem dreh-  
bar gelagerten Steuergerät wird eine starre Rückführung bewirkt.

Eine hydraulische Einheit mit Pumpe und Elektromotor ver-  
sorgt die hydraulische Anlage mit Drucköl. Mittels einer elek-  
trischen Meßeinrichtung, bestehend aus verschiedenen Meß-

<sup>2)</sup> Bei den Messungen und Auswertungen wirkten besonders die Herren  
Hans-Dieter Wiemann und Folker Wiemann mit.

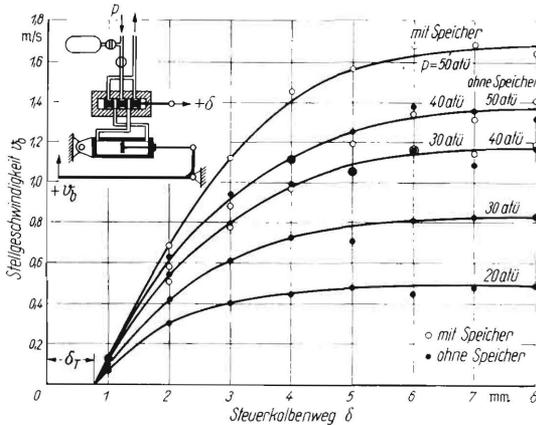


**Bild 6.** Geräteschema der Versuchseinrichtung für die selbsttätige Nachführung eines Rodekörpers durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regulationsanlage.

gebern, Meßverstärkern und einem Lichtstrahloszillographen, wurden folgende Größen in Abhängigkeit von der Zeit registriert: Fühlerwinkel  $\alpha$ , Stellhebelwinkel  $\beta$ , Steuerkolbenweg  $\delta$  des Steuerschiebers gegen das Steuergerätegehäuse, Stellkraft  $P'_H$  und Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  über den Fahrweg  $s_F$  in der Zeiteinheit.

### 3.2 Hydraulisches Steuergerät

Die Kennlinien des für den Aufbau eines möglichst linear arbeitenden hydro-hydraulischen Regulationssystems hergestellten Steuergerätes zeigt **Bild 7**. Darin sind für das gesamte System „Steuergerät mit Stellzylinder und Stellhebel“ die Werte der Stellgeschwindigkeit  $v_b$  am Stellhebelende in Abhängigkeit vom Steuerkolbenweg  $\delta$  aufgetragen, bei Variation des Druckes  $p$  in der hydraulischen Anlage mit und ohne Speicher als Parameter.



**Bild 7.** Stellgeschwindigkeit-Kennlinien des Systems „Steuergerät mit Stellzylinder und Stellhebel“.

$p$  Druck in der hydraulischen Anlage  
 $\delta_T$  Steuerkolbenentweg

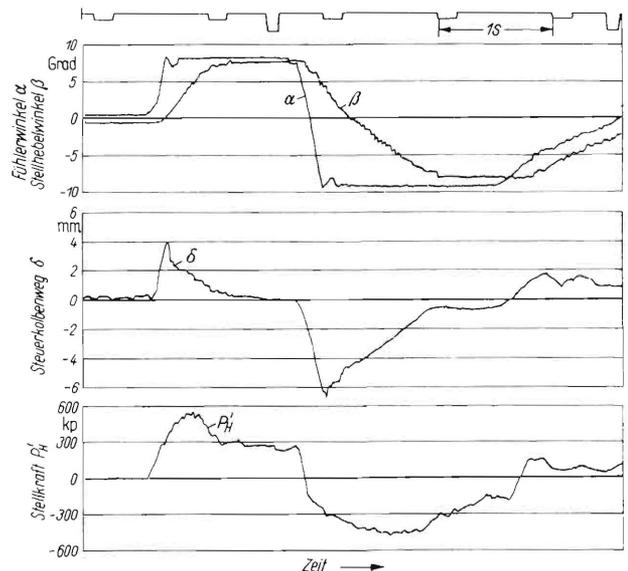
Zur Erzielung einer möglichst guten Linearität wurden ein Steuerkolbenweg  $\delta = \pm 8$  mm und ein Steuerkolbenentweg (positive Überdeckung der Ölbohrungen im Steuergerät für eine ausreichende Dichtung in der Mittellage des Steuerkolbens)  $\delta_T = \pm 0,5$  mm konstruktiv vorgegeben; dies entspricht etwa 6% des Nennwertes des Steuerkolbenweges  $\delta$ . In Wirklichkeit wurde ein annähernd linearer Anstieg der Stellgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Steuerkolbenweg bei kleinen Drücken nur bis zu einem Steuerkolbenweg von etwa  $\delta = \pm 2$  mm und bei höheren Drücken bis etwa  $\delta = \pm 4$  mm erzielt. Der entstandene Steuerkolbenentweg  $\delta_T$  ist aber größer als geplant und beträgt etwa 0,8 mm, das sind 40% von 2 mm bzw. 20% von 4 mm. Obwohl der Regler infolge des vorhandenen Totbereiches nur annähernd stetig wirkt, soll er hier zum Unterschied gegen die untersuchten unstetigen Dreipunktregelungsanlagen als stetiger Regler bezeichnet werden.

In **Bild 7** kann man erkennen, daß es sich um einen Integralregler handelt. Es muß versucht werden, mit einem neuen Steuergerät eine bessere Proportionalität der Stellgeschwindigkeit  $v_b$  als Ausgangswert und dem Steuerkolbenweg  $\delta$  als Eingangswert zu erhalten. Bei der Entwicklung eines stetigen Reglers muß vor allem ein Totweg des Steuergerätes möglichst vermieden werden.

### 3.3 Oszillogramm der Übergangsfunktion

Ein Originaloszillogramm einer Übergangsfunktion der selbsttätigen Werkzeugnachführung im Boden ist in **Bild 8** wiedergegeben. Der Fühlerwinkel  $\alpha$  wurde zuerst in positiver, nach etwa 1 s in negativer Richtung annähernd sprunghaft und am Ende des Oszillogramms langsamer gegen die Nulllinie verstellt. Nach jeder Fühlerverstellung folgt der Stellhebelwinkel  $\beta$  nach dem Ablauf der Stellzeit mit flacherem, näherungsweise linearem Anstieg und erreicht die Größe des Winkels  $\alpha$  mit einer Unsicherheit von etwa  $\pm 1^\circ$ .

Im zeitlichen Verlauf des Steuerkolbenweges  $\delta$  zeigt sich, daß  $\delta$  zuerst mit  $\alpha$  schnell anwächst, dann aber nach Einsetzen der Rückführung bei Änderung von  $\beta$  etwa nach einer e-Funktion abfällt, also sehr schnell wieder kleiner wird. Durch die starre Rückführung wird also der Steuerwert sehr stark verringert, wodurch der Anstieg von  $\beta$  und damit die Stellgeschwindigkeit in unerwünschter Weise herabgesetzt wird.



**Bild 8.** Registrierter zeitlicher Verlauf der Meßgrößen zur Aufnahme der Übergangsfunktion der selbsttätigen Werkzeugnachführung im Boden durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regulationsanlage.

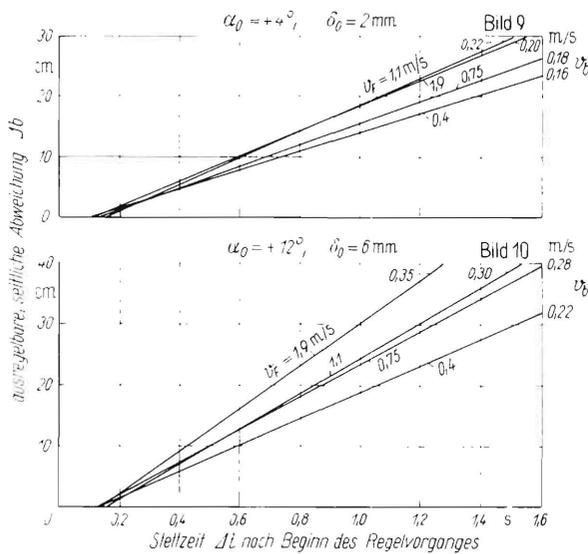
Ölbetriebsdruck in der hydraulischen Anlage  $p = 60$  atü,  
Fühlerausschlag  $\alpha_0 = 8^\circ$  bzw.  $\alpha_0 = 12$  cm,  
Fahrgeschwindigkeit  $v_F = 0,72$  m/s.

Die Stellkraft  $P'_H$  (gemessen am kürzeren Hebelarm des Stellwinkelhebels mit einem Hebel-Übersetzungsverhältnis von 23 cm : 85 cm = 1 : 3,7) erreicht meist vor Ablauf der  $\beta$ -Verstellung ihren maximalen Wert. Beim Betrieb der Anlage mit hydraulischem Speicher ergeben sich grundsätzlich ähnliche Verhältnisse.

Aus der oszillographierten Übergangsfunktion kann man bereits die wichtige Erkenntnis ablesen, daß man bei der untersuchten Nachführungseinrichtung mit hydraulischer Regelungsanlage die proportionale, d. h. starre Rückführung durch eine verzögerte Rückführung ersetzen sollte, um günstigere Geschwindigkeitsverhältnisse zu erhalten.

### 3.4 Idealisierte Übergangsfunktion

Die aus den Oszillogrammen entnommenen idealisierten Übergangsfunktionen der stetigen Regelungsanlage sind in **Bild 9 und 10** für verschiedene Betriebsbedingungen zusammengestellt. Bei verschiedener Verstellung des Werkzeuges von Null aus oder von einem Größtwert der seitlichen Abweichung aus in positiver oder negativer Stellrichtung ergeben sich keine eindeutigen Unterschiede. Deshalb ist nur der Wert für die Verstellung von Null aus in positiver Richtung dargestellt.



**Bild 9 und 10.** Idealisierte Übergangsfunktion der selbsttätigen Werkzeugnachführung im Boden durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regelungsanlage.

Ausregelbare Abweichung  $\Delta b$  in Abhängigkeit von der Stellzeit nach Beginn des Regelungsvorganges für zwei Fühlerauslässe  $\alpha_0 = +4^\circ$  und  $+12^\circ$  bzw.  $\alpha_0 = 6$  und  $18 \text{ cm}$  bei jeweils vier verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten. Ölbetriebsdruck  $p = 50 \text{ atü}$

In **Bild 9** sind die Ergebnisse der Versuche bei einem Druck von  $p = 50 \text{ atü}$  in der hydraulischen Anlage mit einem Fühlerwinkel  $\alpha_0 = +4^\circ$ , bei einer Auslenkung des Fühlerendes  $\alpha_0 = +6 \text{ cm}$  und einem Steuerkolbenweg von  $\delta_0 = +2 \text{ mm}$  dargestellt. **Bild 10** zeigt die entsprechenden Werte für  $\alpha_0 = +12^\circ$ ,  $\alpha_0 = +18 \text{ cm}$  und  $\delta_0 = +6 \text{ mm}$ .

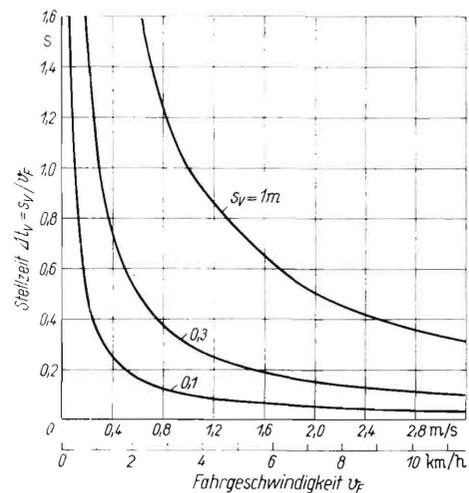
Bei einem Vergleich von **Bild 9** mit **Bild 10** ist die Wirkung der unzureichenden Linearität des Steuergerätes zu erkennen. Bei den untersuchten Fahrgeschwindigkeiten zwischen  $0,4$  und  $1,9 \text{ m/s}$  ergeben sich für  $\delta_0 = 6 \text{ mm}$  nach **Bild 10** scheinbare Stellgeschwindigkeitswerte von  $0,22$  bis  $0,35 \text{ m/s}$ , die infolge der Nichtlinearität der Kennlinien nicht  $3\text{mal}$ , sondern nur etwa  $1,5\text{mal}$  so groß sind wie die scheinbare Stellgeschwindigkeit von  $0,16$  bis  $0,22 \text{ m/s}$  für  $\delta_0 = 2 \text{ mm}$  nach **Bild 9**. Die nicht dargestellten Werte der scheinbaren Stellgeschwindigkeit für  $\alpha_0 = 8^\circ$  liegen näher bei den Werten für  $\alpha_0 = 12^\circ$  als für  $\alpha_0 = 4^\circ$ , bedingt durch die Abflachung der Kennlinie des Steuergerätes. Von der Fahrgeschwindigkeit zeigen die Stellgeschwindigkeitswerte nur eine verhältnismäßig geringe Abhängigkeit.

Die Stelltotzeiten liegen mit etwa  $t_{TS} = 0,15 \text{ s}$  unterhalb denen von anderen untersuchten Nachführungsanlagen [2]. Obwohl diese Totzeiten gegenüber den seither erreichten Werten sehr günstig sind, können sie z. B. für eine Rübenköpfeinrichtung bei höheren Fahrgeschwindigkeiten noch unzulässig hoch sein.

Bei der Ermittlung der wahren Stellgeschwindigkeit gilt nicht die Neigung der ermittelten scheinbaren Stellgeschwindigkeit, sondern die Neigung vom betrachteten Punkt der ausregelbaren Abweichung in **Bild 9** und **10** gegen den Nullpunkt, wobei die Totzeit mit eingeht. Für einen Fühlervorlauf, d. h. für eine örtliche Vorgabe des Fühlerkommandos von  $s_V = 0,75 \text{ m}$  zwischen Fühlerende und Werkzeuglage (in Fahrtrichtung gemessen), kann man z. B. aus **Bild 10** ermitteln, daß mit der untersuchten Anlage je nach Betriebszustand (Fahrgeschwindigkeit usw.) seitliche Abweichungen  $\Delta b$  von  $\pm 15 \text{ cm}$  und mehr ausgeregelt werden können.

Bei der Nachführung durch Hebelverstellung mittels hydrohydraulischer stetiger Regelungsanlage nimmt bei Verringerung des Ölbetriebsdruckes von  $50$  auf  $20 \text{ atü}$  die scheinbare Stellgeschwindigkeit gegenüber den Werten in **Bild 9** und **10** um weniger als die Hälfte ab. Bei Erhöhung des Druckes bis etwa  $p = 80 \text{ atü}$  nimmt die Stellgeschwindigkeit um weniger als auf das Doppelte zu.

Die Größe der Fahrzeitintervalle und damit die verfügbare Stellzeit  $\Delta t_V = s_V/v_F$  für verschiedenen Fühlervorlauf  $s_V$ , die man zum Aufsuchen der  $\Delta b$ -Werte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  braucht, ist in **Bild 11** leicht zu übersehen. Man erkennt sofort, unterhalb welcher Fahrgeschwindigkeit bei einem bestimmten Fühlervorlauf die verfügbare Stellzeit größer als die Stellzeit des Reglers wird, nach der der Regler überhaupt erst anspricht. Zum Ausregeln größerer seitlicher Abweichungen muß jedoch die verfügbare Stellzeit des Reglers um ein Mehrfaches größer sein als die Stelltotzeit. Beispielsweise sind für einen Fühlervorlauf von  $s_V = 0,3 \text{ m}$  und eine Stelltotzeit von ca.  $0,2 \text{ s}$  nur bei Fahrgeschwindigkeiten unterhalb von  $1,5 \text{ m/s}$  ( $5,4 \text{ km/h}$ ) Stellzeiten, die größer als die Stelltotzeit sind, vorhanden. Für den Einsatz eines Nachlaufreglers mit Stellzeiten über  $0,2 \text{ s}$  muß bei höheren Fahrgeschwindigkeiten das Fühlersignal früh genug gegeben werden, d. h., es muß ein ausreichend großer Fühlervorlauf vorgesehen werden.



**Bild 11.** Fahrzeitintervalle  $\Delta t_V = s_V/v_F$  in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit  $v_F$  für verschiedenen Fühlervorlauf  $s_V$ .

Bezüglich der Stelltotzeiten müssen bei der Anwendung von Regelungsanlagen an Landmaschinen oft recht hohe Forderungen gestellt werden. Im Maschinenbau und in der Elektrotechnik liegen — abgesehen von besonderen Systemen, wie z. B. für die Reaktortechnik, Raketentechnik usw. — die kleinsten Stelltotzeiten bei etwa  $0,1 \text{ s}$ . Im Vergleich dazu können die Anforderungen an die Regelungssysteme im Bereich der Landtechnik in der gleichen Größenordnung oder sogar noch höher sein.

### 3.5 Ortskurve des Frequenzganges

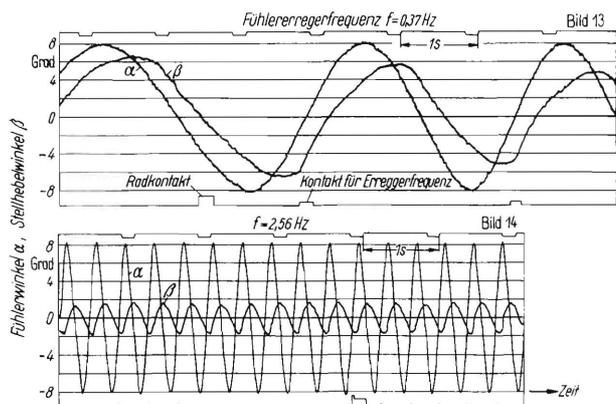
Neben dem Verhalten der Nachführungsanlage bei sprunghafter Änderung des Fühlerausschlages muß man auch das Verhalten der Anlage bei sinusförmiger, d. h. kontinuierlich wechselnder Änderung des Fühlerausschlages durch Aufnahme der Ortskurve des Frequenzganges untersuchen. Hierfür wird das Ende des Fühlers über eine Schubkurbel mit einstellbarer Amplitude und veränderlicher Erregerfrequenz  $f$  sinusförmig hin- und herbewegt und die daraus resultierende, gesteuerte Werkzeugbewegung gemessen. Dabei ergibt sich der in **Bild 12** prinzipiell dargestellte zeitliche Verlauf des Fühlerwinkels  $\alpha$  und des Stellhebelwinkels  $\beta$ .



**Bild 12.** Prinzipieller zeitlicher Verlauf des Fühlerwinkels  $\alpha$  und Stellhebelwinkels  $\beta$  bei sinusförmiger Nachführungsbewegung.

$T_S$	Periodendauer der sinusförmigen Nachführungsbewegung
$\Delta t_\theta$	Phasenlaufzeit der Phasenverschiebung $\theta$ (in Winkelgrad) zwischen $\alpha$ und $\beta$
$s_S$	Periodenbasis der Nachführungsbewegung
$v_F$	Fahrgeschwindigkeit

In **Bild 13** und **14** ist der bei Versuchen zur Aufnahme des Frequenzganges der Anlage registrierte Verlauf des Fühlerwinkels  $\alpha$  und des Stellhebelwinkels  $\beta$  des Werkzeuges für zwei Fühler-Erregerfrequenzen  $f = 0,37$  und  $2,56$  Hz wiedergegeben, und zwar für die in der Bildunterschrift angegebenen Betriebsbedingungen. Bei einem Vergleich dieser beiden Bilder erkennt man die Abnahme des Reglerausgangswertes  $\beta$  und die Zunahme der Phasenverschiebung zwischen  $\alpha$  und  $\beta$  mit höherer Fühler-Erregerfrequenz.



**Bild 13 und 14.** Zeitlicher Verlauf der Bewegungen bei einer kontinuierlichen, sinusförmigen selbsttätigen Werkzeugnachführung im Boden zur Aufnahme der Ortskurve des Frequenzganges bei Nachführung durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regelungsanlage für zwei Fühler-Erregerfrequenzen  $f = 0,37$  Hz und  $2,56$  Hz.

Ölbetriebsdruck	$p = 50$ atü
Fühlerwinkelamplitude	$\alpha_{\max} = \pm 8^\circ$
Fühlerendenamplitude	$a_{\max} = \pm 12$ cm
Steuerkolbenweg	$\delta_{\max} = \pm 4$ mm
Fahrgeschwindigkeit	$v_F = 0,4$ m/s

Die aus solchen Oszillogrammen entwickelte Ortskurve des Frequenzganges der Nachführungsanlage zeigt **Bild 15** und **16** für zwei Fahrgeschwindigkeiten. Aus versuchstechnischen Gründen konnte die Ortskurve nicht zu höheren Frequenzen weiter verfolgt werden, aber man erkennt bereits in dem gezeigten Verlauf, daß es sich um einen Regler mit Verzögerung höherer Ordnung handelt und daß das System stabil arbeitet.

Aus der in den Ortskurven ablesbaren Größe der Phasenverschiebung  $\theta$  für verschiedene Fühler-Erregerfrequenzen lassen

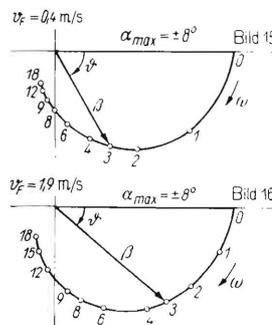
sich die auftretenden Phasenlaufzeiten  $\Delta t_\theta$  ermitteln. So ist z. B. aus **Bild 15** für  $\omega = 3,14$  s<sup>-1</sup> (d. h. für eine Fühler-Erregerfrequenz  $f = 0,5$  Hz bzw. Periodendauer  $T_S = 2$  s, entsprechend einer Periodenbasis der sinusförmigen seitlichen Abweichung von  $s_S = v_F T_S = 0,4 \cdot 2 = 0,8$  m) die Phasenverschiebung  $\theta = 60^\circ$  und damit die Phasenlaufzeit  $\Delta t_\theta = T_S \theta / 360 \approx 0,33$  s. Wenn das Fahrzeitintervall  $\Delta t_V = s_V / v_F$  zum Durchlaufen des Fühlervorlaufes  $s_V$  gleich der Phasenlaufzeit  $\Delta t_\theta$  gemacht wird, dann wird die Genauigkeit der Nachführung außer durch die in der Ortskurve ablesbare Verkleinerung der Amplitude der seitlichen Werkzeugbewegung — im vorliegenden Fall z. B. auf etwa 60% der Fühleramplitude — nicht auch noch durch einen Phaseneinfluß gestört. Hierfür ist im betrachteten Fall z. B. ein Fühlervorlauf  $s_V = v_F \Delta t_\theta = 0,4 \cdot 0,33 \approx 0,13$  m nötig. Dieser kurze Fühlervorlauf von nur 13 cm wird sich in vielen Fällen praktisch kaum verwirklichen lassen und ist außerdem für die Ausregelung von sprunghaften seitlichen Abweichungen zu klein, weil der Regler erst nach etwa  $0,15$  s (siehe **Bild 9** und **10**) anspricht.

Bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $v_F = 1,9$  m/s ergeben sich nach **Bild 16** für  $\omega = 3,14$  s<sup>-1</sup> (d. h. für die Fühler-Erregerfrequenz  $f = 0,5$  Hz, entsprechend einer Periodenbasis einer sinusförmigen Abweichung von  $s_S = 1,9 \cdot 2 = 3,8$  m) die Phasenverschiebung  $\theta = 40^\circ$  und die Phasenlaufzeit  $\Delta t_\theta = 0,22$  s. Der hierfür nötige Fühlervorlauf ist  $s_V = 1,9 \cdot 0,22 = 0,42$  m. Die Amplitude der seitlichen Werkzeugbewegung beträgt dabei etwa 80% der vorgegebenen Amplitude der Fühlerbewegung.

Gibt man eine Periodenbasis der sinusförmigen Abweichung von  $s_S = 0,8$  m wie im ersten Beispiel vor, so ergibt sich bei  $v_F = 1,9$  m/s eine Fühler-Erregerfrequenz von  $f = v_F / s_S = 1,9 / 0,8 = 2,38$  Hz und  $\omega = 15$  s<sup>-1</sup>. Aus der Ortskurve in **Bild 16** erhält man eine Phasenverschiebung  $\theta = 110^\circ$  und eine Phasenlaufzeit von  $\Delta t_\theta = 0,13$  s. Für den Durchlauf dieser Zeit wäre bei  $v_F = 1,9$  m/s ein Fühlervorlauf von  $s_V = 1,9 \cdot 0,13 = 0,25$  m nötig. Die Amplitude der seitlichen Werkzeugbewegung beträgt dabei aber nur noch etwa 27% der vorgegebenen Fühleramplitude von 12 cm.

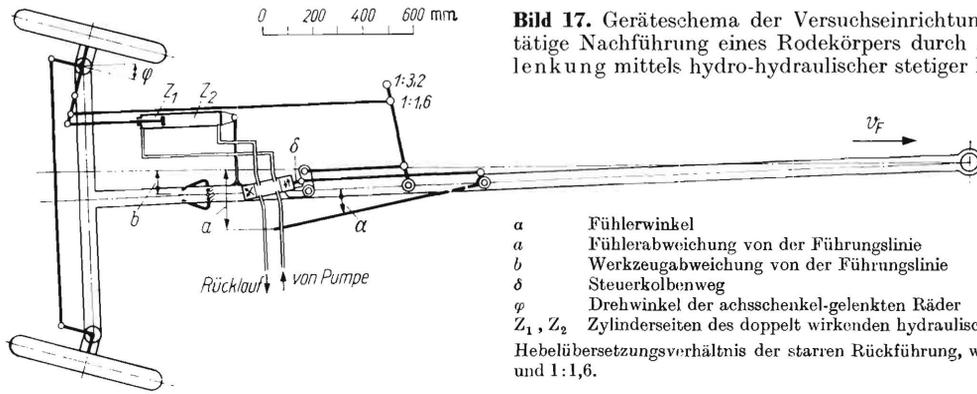
Da man unter den beschriebenen Bedingungen je nach Fahrgeschwindigkeit und vor allem nach der Fühler-Erregerfrequenz einen unterschiedlichen Fühlervorlauf braucht, zeigen diese Überlegungen, daß man bei festem Fühlervorlauf für jeden Betriebszustand allein durch den Phaseneinfluß eine unterschiedliche Genauigkeit der Nachführung erhält. Dazu kommt noch die Amplitudenabhängigkeit der Werkzeugbewegung von der Fühlerfrequenz.

Für die praktische Anwendung der Nachführung von Werkzeugen an Landmaschinen muß man in vielen Fällen eine Nachführungsunsicherheit von weniger als 10% der maximalen Abweichung fordern. Da jedoch alle oben ermittelten Werte der



**Bild 15 und 16.** Ortskurve des Frequenzganges der selbsttätigen Werkzeugnachführung durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regelungsanlage bei zwei Fahrgeschwindigkeiten  $v_F = 0,4$  und  $1,9$  m/s.

Ölbetriebsdruck	$p = 50$ atü
Amplitude des Fühlerwinkels	$\alpha_{\max} = \pm 8^\circ$
max. Abweichung der Fühlerspitze von der Führungslinie	$a_{\max} = \pm 12$ cm
$\beta$	Stellhebelwinkel
$\theta$	Phasenverschiebung
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit der Fühler-Erregerfrequenz
$v_F$	Fahrgeschwindigkeit



**Bild 17.** Geräteschema der Versuchseinrichtung für die selbsttätige Nachführung eines Rodekörpers durch Achsschenkellenkung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regulationsanlage.

- a Fühlerwinkel
  - a Fühlerabweichung von der Führungslinie
  - b Werkzeugabweichung von der Führungslinie
  - delta Steuerkolbenweg
  - phi Drehwinkel der achsschenkel-gelenkten Räder
  - Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub> Zylinderseiten des doppelt wirkenden hydraulischen Stellzylinders
- Hebelübersetzungsverhältnis der starren Rückführung, wählbar zu  $i = 1:3,2$  und  $1:1,6$ .

betrachteten Beispiele für Fühler-Erregerfrequenzen von über 0,5 Hz in bezug auf den Fühlervorlauf und auf die Phasenlaufzeit Grenzwerte darstellen und die Nachführungsgenauigkeit nicht ausreicht, erkennt man, daß die beschriebene Nachführungsanlage mit ausreichender Genauigkeit nur für seitliche Abweichungen mit verhältnismäßig niedriger Fühler-Erregerfrequenz weit unterhalb von 1 Hz, mindestens unter 0,2 Hz, also nur für langsame Abweichungen brauchbar ist. Nur dann wird die in der Ortskurve erkennbare Amplituden- und Phasenänderung der Werkzeugbewegung ausreichend klein sein.

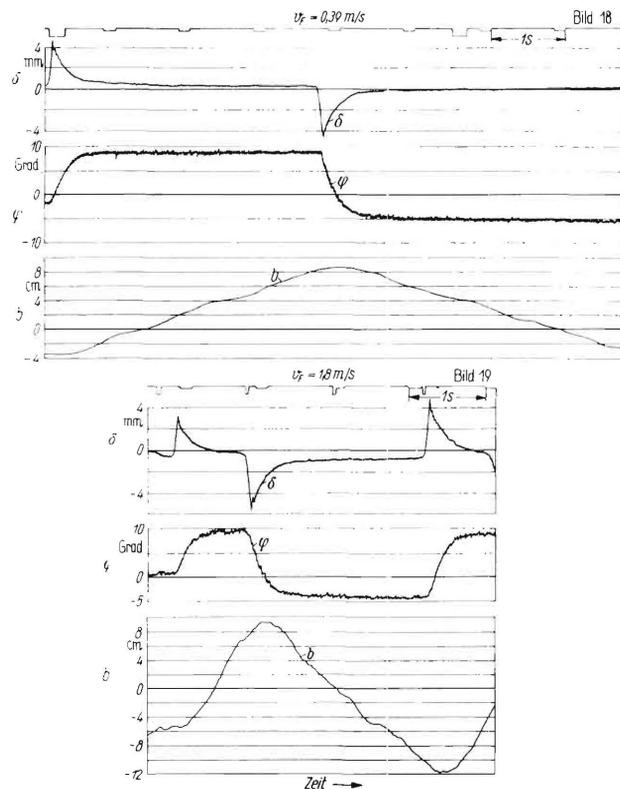
Die vorliegenden Betrachtungen zeigen, daß man durch meßtechnische Untersuchungen für eine selbsttätige Nachführungsanlage die ausregelbaren Werte bei sprungweisen Abweichungen mit Hilfe der Übergangsfunktion ermitteln kann, dazu aber den

Anwendungsbereich für sinusförmige, d. h. wechselnde Abweichungen durch Aufnahme der Ortskurve des Frequenzganges abgrenzen muß. Außerdem ist es zweckmäßig, sich mit Hilfe von theoretischen Untersuchungen mit elektronischen Rechenmaschinen eine Übersicht über das Verhalten der Nachführungsanlage bei verschiedenen Betriebszuständen zu verschaffen [8].

#### 4. Nachführungssystem mit Achsschenkellenkung mit hydraulischem stetigem Regler

Die vorstehend beschriebenen hydraulischen Regelgeräte wurden auch bei der Nachführung durch Achsschenkellenkung untersucht. In **Bild 17** ist das zugehörige Geräteschema dargestellt. Die starre Rückführung konnte in zwei Stufen mit dem Hebelübersetzungsverhältnis  $i = 1:3,2$  und  $i = 1:1,6$  variiert werden. In **Bild 18 und 19** sind zwei Original-Oszillogramme der Übergangsfunktion im Boden bei zwei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten wiedergegeben. Nach einer sprungweisen Fühlerverstellung steigt der Radwinkel  $\phi$  verhältnismäßig rasch an, doch die Werkzeugabweichung  $\Delta b$  folgt vor allem bei kleiner Fahrgeschwindigkeit sehr langsam. Der Steuerkolbenweg  $\delta$  wird nach Einsetzen der Rückführung wiederum sehr schnell abgebaut.

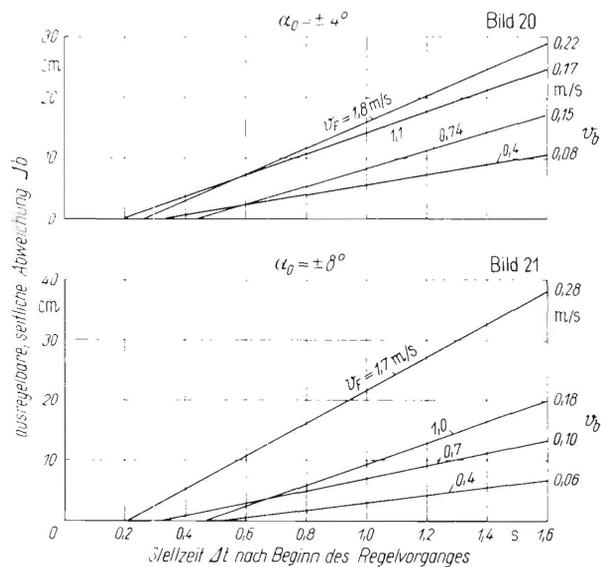
**Bild 20 und 21** zeigt die aus den Oszillogrammen erhaltenen idealisierten Übergangsfunktionen für einen Fühlerverstellungswinkel von  $\alpha_0 = 4^\circ$  bzw.  $8^\circ$  für ein Hebelübersetzungsverhältnis der Rückführung von  $1:3,2$ . Bei einem Hebelübersetzungs-



**Bild 18. und 19.** Registrierter zeitlicher Verlauf der Meßgrößen zur Aufnahme der Übergangsfunktion der selbsttätigen Werkzeugnachführung im Boden durch Achsschenkellenkung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regulationsanlage bei zwei Fahrgeschwindigkeiten  $v_F = 0,39$  und  $1,8$  m/s.

Bodenfeuchtigkeit in 1 bis 10 cm Tiefe 12 bis 15%  
Porenanteil in 1 bis 10 cm Tiefe 35 bis 44%

- Ölbetriebsdruck  $p = 30$  atü
- Fühlerwinkelausschlag  $\alpha_0 = 4^\circ$
- Fühlerendenausschlag  $\alpha_0 = 6$  cm
- Steuerkolbenweg  $\delta$
- Drehwinkel  $\phi$  der achsschenkel-gelenkten Räder
- Werkzeugabweichung  $b$  von der Führungslinie

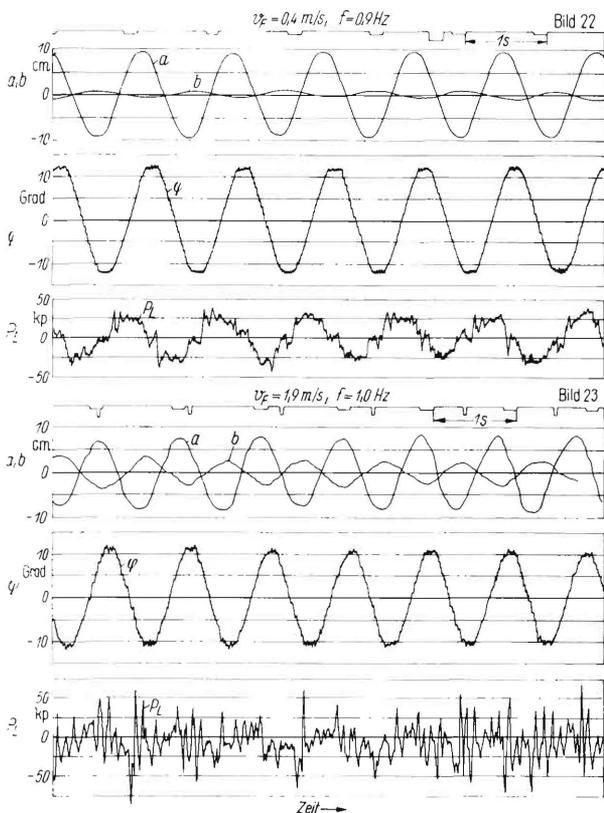


**Bild 20 und 21.** Idealisierte Übergangsfunktion der selbsttätigen Werkzeugnachführung im Boden durch Radlenkung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regulationsanlage für zwei Fühlerauschlagswinkel  $\alpha_0$  und für ein Hebelübersetzungsverhältnis der Rückführung von  $i = 1:3,2$ .

- Ölbetriebsdruck  $p = 50$  atü
- Fühlerwinkelausschlag  $\alpha_0 = \pm 4^\circ$  und  $\pm 8^\circ$
- Fühlerendenausschlag  $\alpha_0 = \pm 6$  und  $12$  cm

verhältnis von 1:1,6 ergeben sich ähnliche, nur ganz wenig kleinere Werte der Stellgeschwindigkeit.

Zwei Oszillogramme zur Aufnahme der Ortskurve des Frequenzganges sind in **Bild 22 und 23** wiedergegeben. In der aus solchen Oszillogrammen ermittelten Ortskurve des Frequenzganges nach **Bild 24 und 25** kann man sehr gut erkennen, daß diese Anlage infolge der großen zu bewegenden Massen im Vergleich zur Anlage mit Hebelverstellung sehr träge arbeitet.



**Bild 22 und 23.** Zeitlicher Nachführungsvorgang zur Aufnahme der Ortskurve des Frequenzganges bei der selbsttätigen Werkzeugnachführung durch Radlenkung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regulationsanlage bei zwei Fahrgeschwindigkeiten  $v_F = 0,4$  und  $1,9$  m/s.

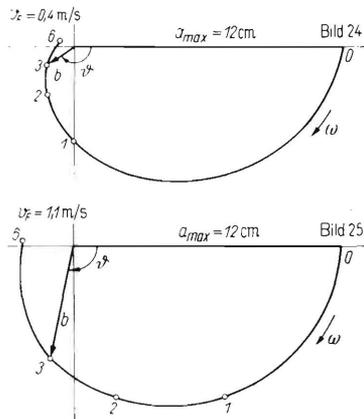
- Bodenfeuchtigkeit in 1 bis 10 cm Tiefe 10 bis 14%
- Porenanteil in 1 bis 5 cm Tiefe 35 bis 45%
- Ölbetriebsdruck  $p = 50$  atü
- Fühlerwinkelamplitude  $a_{max} = \pm 6^\circ$
- Fühlerendenamplitude  $a_{max} = \pm 9$  cm
- $f$  Fühler-Erregerfrequenz
- $b$  Werkzeugabweichung von der Führungslinie
- $\varphi$  Drehwinkel der achsschenkel-gelenkten Räder
- $P_L$  Kraft zur Verstellung der Achsschenkel, bez. a. d. Stellzylinder

### 5. Vergleich der Stellgeschwindigkeiten verschiedener Systeme

Für eine Übersicht über das Verhalten der untersuchten Regulationsanlagen bei der Nachführung von sprungweisen seitlichen Abweichungen sind in der **Tafel I** die Werte für die Stellzeiten, die scheinbaren Stellgeschwindigkeiten sowie einige aus der idealisierten Übergangsfunktion der einzelnen Anlagen für verschiedene Betriebszustände (Fühlervorlauf, Fahrgeschwindigkeit) entnommenen Grenzwerte für die ausregelbare seitliche Abweichung  $\Delta b$  zusammengestellt.

Obwohl die vergleichbaren Zahlenwerte in der gleichen Größenordnung liegen, kann man doch die Überlegenheit der Nachführungsanlage durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischem Regler (H/S/HH) erkennen. Dazu trägt die kleinste Stellzeit dieser Anlage wesentlich bei.

Zum Vergleich der errechneten und gemessenen scheinbaren Stellgeschwindigkeit sei als Beispiel erwähnt, daß bei der Nachführungsanlage durch Hebelverstellung mittels elektro-hydraulischem Dreipunktregler die gemessenen Werte bei der Verstel-



**Bild 24 und 25.** Ortskurve des Frequenzganges der selbsttätigen Werkzeugnachführung durch Radlenkung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regulationsanlage bei zwei Fahrgeschwindigkeiten  $v_F$ .

- Ölbetriebsdruck  $p = 50$  atü
- Fühlerwinkelamplitude  $a_{max} = \pm 8^\circ$
- Fühlerendenamplitude  $a_{max} = \pm 12$  cm

lung im Boden zwischen 5 bis 60%, bei Verstellung in Luft zwischen 50 bis 200% der gerechneten Werte liegen. Da sich auch die Totzeiten rechnerisch nicht exakt ermitteln lassen, sind meßtechnische Untersuchungen an ausgeführten Nachführungsanlagen nötig. Mit Hilfe der dabei gewonnenen Unterlagen ist es möglich, die geeigneten Betriebsbedingungen für bestimmte Verhältnisse einer selbsttätigen Nachführungsanlage für eine sprungweise Werkzeugverstellung auszusuchen und festzulegen.

Da alle zusammengehörigen Werte in der Tafel I in der gleichen Größenordnung liegen, kann man daraus allgemein die Grenzen der Ausregelbarkeit von seitlichen Abweichungen bei der selbsttätigen Nachführung von landwirtschaftlichen Geräten mit Regulationsanlagen erkennen. Zur Erfüllung der wichtigsten Forderung nach einfacher, der untersuchten vergleichbaren Verringerung der Stellzeit für Nachführungsanlagen bei hoher Fahrgeschwindigkeit oder bei kleinem Fühlervorlauf müssen besondere Maßnahmen, wie z. B. die Verwendung von Steuergeräten mit möglichst geringem Totbereich oder die Speicherung des Meßwertes mit Tast-Regelsystemen, getroffen werden.

### 6. Stelleistungsspitzen

#### 6.1 Selbsttätige Nachführung einer Rübenreihe

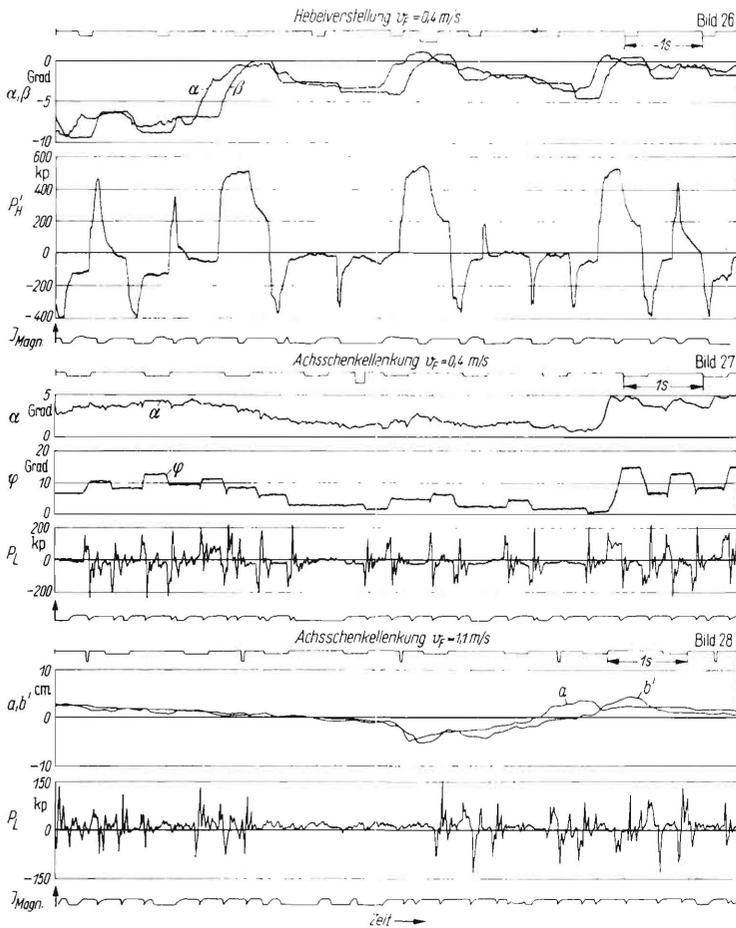
Im praktischen Einsatz einer selbsttätigen Nachführungsanlage beim Geradeausfahren längs einer gewachsenen Rübenreihe ist der Regler fast dauernd in Funktion, wie die **Bilder 26 bis 28** als Beispiel für die Nachführung eines Rübenrodekörpers

**Tafel I.** Zusammenstellung von Weg-, Zeit- und Geschwindigkeits-Werten verschiedener Nachführungsanlagen

Nachführungs-system *)	Stellzeit $t_{TS}$ s	scheinbare Stellgeschwindigkeit $v_b$ m/s	ausregelbare, seitliche Abweichung $\Delta b$ in cm bei **)			
			0,3 m		1,0 m	
			$v_F$	$\Delta t_V$	$v_F$	$\Delta t_V$
H/D/EH	0,3 ... 0,4	0,05 ... 0,57	8	3	25	14
L/D/EH	0,3 ... 0,4	0,08 ... 0,34	3	2	16	7
H/D/EM	0,1 ... 0,4	0,13 ... 0,27	7	4	18	4
H/S/HH	0,1 ... 0,2	0,16 ... 0,35	13	8	22	13
L/S/HH	0,2 ... 0,6	0,04 ... 0,28	4	1	12	8

- \*) H Nachführung durch Hebelverstellung
- L Nachführung durch Radlenkung
- D Dreipunktregler
- S Stetiger Regler
- EH Elektro-hydraulische Regulationsanlage
- EM Elektro-mechanische Regulationsanlage
- HH Hydro-hydraulische Regulationsanlage

- \*\*)  $s_V$  = Fühlervorlauf
- $v_F$  = Fahrgeschwindigkeit
- $\Delta t_V$  =  $s_V/v_F$  Fahrzeitintervall



**Bilder 26 bis 28.** Registrierter zeitlicher Verlauf der Meßgrößen bei selbsttätiger Rodekörper-Nachführung durch Hebelverstellung oder Radlenkung mit elektro-hydraulischen Dreipunktregelungsanlagen beim Roden gewachsener Rüben.

- Ölbetriebsdruck  $p = 40$  atü
- $\alpha$  Fühlerwinkel
- $\beta$  Stellhebelwinkel
- $\varphi$  Winkel der achsschenkel-gelenkten Räder
- $a$  Fühlerendenabweichung
- $b$  Werkzeugabweichung von der Führungslinie
- $P'_H$  Kraft am Stellhebel, bezogen auf den Stellzylinder
- $P'_L$  Kraft zur Verstellung der Achsschenkel, bezogen auf den Stellzylinder
- $J_{Magn}$  Strom des elektromagnetischen Steuergerätes

durch Hebelverstellung oder durch Radlenkung mittels eines elektro-hydraulischen Dreipunktreglers erkennen lassen.

In Bild 26 mit dem Oszillogramm für die Hebelverstellung sind die Werte für  $\alpha$  und  $\beta$  praktisch einander gleich, die Kraft  $P'_H$  zeigt einen häufig wechselnden Verlauf und der Strom  $J_{Magn}$  des elektromagnetischen Steuergerätes zeigt keine längeren Unterbrechungen. Ähnliche Verhältnisse sind bei der Radlenkung in Bild 27 und 28 vorhanden. Hierbei stimmen die Werte von  $a$  und  $b$  gut überein, der Strom  $J_{Magn}$  schaltet dauernd ein und aus.

Da der Regler dauernd nur kurzzeitig zum Eingriff kommt, ist praktisch immer der Anlaufvorgang vorhanden. Für die Bemessung des Stellgliedes ist jedoch nicht die Stellkraft, sondern die Stelleistung, d. h. das Produkt aus Stellkraft und Stellgeschwindigkeit, an einer Stelle des Systems maßgebend. Zur Ermittlung der Stelleistung des Reglers ist es zweckmäßig, den

Anfangswert der Kraft zu berücksichtigen, damit der Stellmotor nicht zu klein bemessen wird und somit im Betrieb nicht überlastet werden kann.

**6.2 Stelleistungsspitzen bei sprunghafter Nachführung eines Rodekörpers**

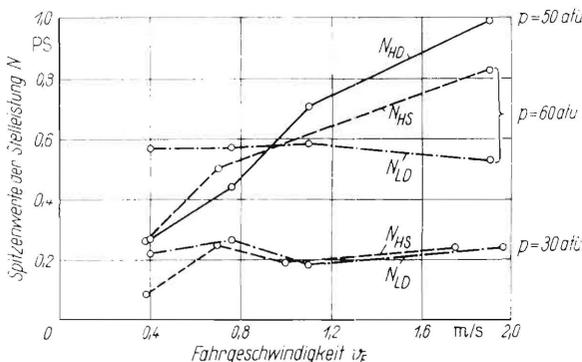
Zum Vergleich der Größe von Stelleistungsspitzen verschiedener Nachführungssysteme sind in Bild 29 die aus den Stellkraftspitzen und der scheinbaren Stellgeschwindigkeit ermittelten Stelleistungsspitzen  $N$  in PS über der Fahrgeschwindigkeit  $v_f$  aufgetragen.

Man erkennt, daß beim Betrieb der Nachführung des Rübenrodekörpers durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischen stetigen Reglers die Stelleistungsspitzen  $N_{HS}$  mit der Fahrgeschwindigkeit bei kleinem Ölbetriebsdruck von  $p = 30$  atü nur wenig (0,1 bis 0,2 PS), bei  $p = 60$  atü dagegen stark (0,3 bis 0,8 PS) ansteigen.

Am stärksten nehmen die Leistungsspitzen  $N_{HD}$  mit der Fahrgeschwindigkeit bei Nachführung durch Hebelverstellung mittels elektro-hydraulischen Dreipunktreglers zu (von 0,3 bis 1 PS).

Die Stelleistungsspitzen  $N_{LD}$  für die Nachführung durch Achsschenkel lenkung mittels elektro-hydraulischen Dreipunktreglers sind jedoch von der Fahrgeschwindigkeit praktisch unabhängig. Mit Erhöhung des Druckes in der hydraulischen Anlage nehmen jedoch die Leistungswerte zu: für  $p = 30$  atü ist  $N_{LD}$  etwa 0,2 PS und für  $p = 60$  atü etwa 0,5 bis 0,6 PS.

Die Spitzenwerte der Stelleistung für die Nachführung des Rübenrodekörpers durch Hebelverstellung mittels elektro-mechanischen Dreipunktreglers liegen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten im unteren Bereich der in Bild 29 dargestellten Systeme. Sie liegen meist bei 0,1 PS und streuen bis etwa 0,3 PS. Bei der Nachführung durch Achsschenkel lenkung mittels hydro-hydraulischen Reglers sind die Stelleistungsspitzen noch kleiner.



**Bild 29.** Vergleich von Stelleistungsspitzen bei selbsttätiger Nachführung eines Rübenrodekörpers durch Hebelverstellung mittels elektro-hydraulischer Dreipunktregelungsanlage (HD), durch Achsschenkel lenkung mit elektro-hydraulischer Dreipunktregelungsanlage (LD) und durch Hebelverstellung mittels hydro-hydraulischer stetiger Regelungsanlage (HS).

Als wichtiges Ergebnis kann festgestellt werden, daß alle aus den Versuchen für verschiedene Nachführungssysteme ermittelten Werte für Stelleistungsspitzen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten hauptsächlich im Bereich von 0,1 bis 0,8 PS liegen und unter vergleichbaren Bedingungen auffallend gut miteinander übereinstimmen. Diese Unterlagen stellen somit brauchbare Werte für den Entwurf und die Bemessung von Regelungsanlagen für die selbsttätige sprungweise Nachführung von Rübenrodescharen dar. Auf Grund der großen Ähnlichkeit der an verschiedenen Regelungsanlagen ermittelten Werte der Stellgeschwindigkeit sowie der Stellzeit und der Stellleistung kann gefolgert werden, daß diese Unterlagen für ähnliche Bedingungen auf andere Systeme übertragen werden können.

## 7. Zusammenfassung

Für die Nachführung eines Arbeitselementes oder einer Landmaschine längs einer Leitlinie in der horizontalen Ebene wurden zwei kinematische Anordnungen untersucht. Dabei wurde ein Rübenrodekörper entweder durch einen Hebel relativ zum Fahrgestell eines Arbeitsgerätes verschoben, oder der Rodekörper war fest mit dem Gerät verbunden und wurde über dessen achsschenkel-gelenkte Räder nachgeführt. Dabei wurden verschiedene Kombinationen mit elektro-hydraulischer oder elektro-mechanischer Dreipunktregelungsanlage bzw. mit hydro-hydraulischer stetiger Regelungsanlage untersucht.

Einen guten Einblick über das zeitliche Verhalten verschiedener Regelungsanlagen ergibt die Übergangsfunktion bei der sprungweisen Nachführung des Rodekörpers. Aus den aufgenommenen Übergangsfunktionen erhält man Unterlagen für die Ermittlung der Betriebsbedingungen für bestimmte Verhältnisse der Fahrgeschwindigkeit, des Fühlervorlaufs, d. h. der Vorgabe des Fühlerkommandos, weiter des hydraulischen Druckes in der Anlage usw. für die Ausregelbarkeit einer vorgegebenen sprungweisen seitlichen Abweichung.

Durch Aufnahme der Ortskurve des Frequenzganges läßt sich der Anwendungsbereich einer Nachführungsanlage für kontinuierlich, sinusförmig wechselnde Abweichungen abgrenzen.

Die wahre Stellgeschwindigkeit ist wegen der Stellzeit etwas kleiner als die scheinbare Stellgeschwindigkeit, die sich aus der Neigung der idealisierten Übergangsfunktion ergibt. Aus den erhaltenen Diagrammen für die Übergangsfunktion kann man ablesen, daß je nach Nachführungssystem bei verschiedenen Betriebsbedingungen bei einem Fühlervorlauf von 1 m seitliche Abweichungen von 12 bis 25 cm bis zu Fahrgeschwindigkeiten von 1,1 m/s und 8 bis 10 cm bis 1,9 m/s ausgeregelt werden können. Für einen kürzeren Fühlervorlauf von 0,3 m ergeben sich kleinere Werte der ausregelbaren, sprungweisen Abweichungen von 4 bis 13 cm bei Fahrgeschwindigkeiten bis 0,4 m/s bzw. 1 bis 8 cm bei Fahrgeschwindigkeiten bis 0,75 m/s.

Bei kontinuierlich sinusförmig wechselnden seitlichen Abweichungen ergeben sich ausreichend kleine Nachführungsfehler nur bei sehr niedrigen Fühlerfrequenzen von weit unter 1 Hz.

Mit Nachführungsanlagen durch Hebelverstellung erhält man günstigere Ergebnisse als durch Achsschenkelenkung, wo sich die großen bewegten Massen durch ihre große Trägheit nachteilig auswirken. Da die größten Regelgeschwindigkeiten mit einem Regler mit kleiner Stellzeit erreicht werden, gilt als Voraussetzung für den Einsatz von Nachführungsanlagen bei hoher Fahrgeschwindigkeit und bei kleinem Fühlervorlauf eine möglichst geringe Stellzeit. Die Anforderungen an Regelungsanlagen in bezug auf deren Stellgeschwindigkeit für die Anwendung an Landmaschinen können ebenso hoch oder höher liegen als in anderen Bereichen der Technik.

Für die Bemessung eines Stellgliedes muß vor allem die Stelleistung, d. h. das Produkt aus Stellkraft und Stellgeschwindigkeit an irgend einer Stelle des Systems bekannt sein. Da sich im praktischen Betrieb von Nachführungsanlagen ergeben hat, daß der Regler meist dauernd nur kurzzeitig zum Eingriff kommt, ist fast immer nur der Anlaufvorgang mit seinen Spitzenwerten der Anlaufkraft wirksam. Unter Berücksichtigung dieser Anlaufkraftspitzen ergeben sich für die verschiedenen Anlagen Stelleistungsspitzen etwa zwischen 0,2 und 1 PS, die unter vergleichbaren Bedingungen sehr ähnlich sind.

Die weitgehende Übereinstimmung der gemessenen Ausregelbarkeit von sprungweisen seitlichen Abweichungen und der nötigen Spitzenwerte der Stelleistung bei den verschiedenen untersuchten Regelungsanlagen für die selbsttätige Nachführung von Rübenrodekörpern ergibt ein sehr ähnliches zeitliches Verhalten der verschiedenen Anlagen. Somit kann gefolgert werden, daß sich die erhaltenen Ergebnisse ganz allgemein für vergleichbare Bedingungen auf andere Systeme sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene übertragen lassen.

Zur Schaffung weiterer Unterlagen für die Synthese von Nachführungsanlagen wären noch andere Regelungsanlagen (z. B. Abtastsysteme) und kinematische Anordnungen (z. B. mit möglichst geringen Stellkräften und mit Übersteuerung bei der Nachführung [9]) zu entwickeln und durch Messungen im Betrieb sowie durch Rechnungen auf dem Analogrechner zu untersuchen. Dazu kommt noch die Behandlung der Fühlerprobleme für besondere Anwendungsgebiete.

Die selbsttätige Regelung an Landmaschinen hat den Zweck, menschliche Arbeitskraft auf der Maschine einzusparen, die Bedienungsarbeit zu erleichtern, die Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine zu erhöhen, die Maschinen optimal auszunutzen und die Arbeitsgüte zu verbessern. Als letztes Ziel bietet die selbsttätige Regelung durch Kombination der Regelungstechnik und Fernsteuerungstechnik die Voraussetzung für das Arbeiten der Schlepper und Landmaschinen vollkommen ohne ständige menschliche Bedienungskraft.

## Schrifttum

- [1] *Oppelt, W.*: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie GmbH 1960. 3. Aufl.
- [2] *Batel, W., und R. Thiel*: Über die selbsttätige Regelung an Landmaschinen. In: 19. Konstrukteurheft Düsseldorf: VDI-Verlag 1962. S. 5/13 (Grundlagen der Landtechnik H. 14).
- [3] *Richey, C. B.*: „Automatic Pilot“ for farm tractors. *Agric. Engng.* **40** (1959) Nr. 2, S. 78/79.
- [4] *Jamieson, M., und A. R. Reece*: The Kinematics of Rowerop Tractors. *J. Agric. Engng. Research* **6** (1961) Nr. 4, S. 278/87.
- [5] *Hajek, F.*: Automaticky rizena plecka KPN 6 — A (Automatisch gesteuerte Hackmaschine KPN 6 — A). *Mechanizace zemedelstvi* **10** (1960) Nr. 4, S. 86/89.
- [6] *Besednov, M. W., und A. W. Galkin*: Elektro-hydraulischer Antrieb beweglicher Arbeitswerkzeuge von Hackmaschinen. *Chlopkovodstvo, Moskva* **11** (1961) Nr. 5, S. 37/41.
- [7] *Guljaev, G. A.*: Automatische Regelung der Beschickung des Druschapparates von Mähdreschern. *Mechanizacija i Elektrifikacija* **19** (1961) Nr. 5, S. 18/23.
- [8] *Liljedahl, L. A., und J. Strait*: Automatic Tractor Steering. *Agricult. Engng.* **43** (1962) Nr. 6, S. 332/35 u. 349 und Nr. 7, S. 407/08.
- [9] *Hain, K.*: Systematik und Kinematik von Nachführungsanlagen. (Erscheint im nächsten Heft der „Grundl. d. Landtechnik“.)